

1. はじめに 河口感潮部, エスチュアリーにおける底泥の挙動を把握することは, 水圏環境保全の基礎的資料を得る意味において重要である。しかし, 凝集性を有する底泥の水理学的挙動は, その物性, 水温, 水中の塩分濃度の相異により複雑となり, その解明には至っていないのが現状である。以上の観点に基づき, 筆者らは, 凝集性を有する粘性土の沈降特性を実験的に明らかにすると共に, 一定剪断応力下での一般的な濃度減少曲線を導いた。そこで, 本報では, 境界層の中に存在する粒子に作用する浮力が d_0 (ある剪断応力下で沈降可能な粒子径の最小のもの)を作り出すという物理的表示を用いて, 濃度減少曲線を導き, $\frac{C-C_0}{C_0-C_0} = 0.5$ となる基準時間の予測を可能にした。さらに, 実際の筑後川の底泥を用いて式の適用性の検討を行なった。

2. 実験装置及び方法 実験に用いた回転円形水路を図-1に示す。水路は深さ25cm, 内径90cm, 外径110cmである。遠心力による2次流の影響が底面付近で最少になる様にあらかじめ求めた関係のもとで水路とリングを逆方向に回転させ所定の剪断応力を得られる様にした。実験は, 比重1.025(並品使用)の塩水を用い, 水深を15cmに保ち, 所定の濃度の粘土懸濁液を充分に攪拌した後, 所定の剪断応力の下で行った。実験時の水深基準レイノルズ数は, $(2 \times 8) \times 10^4$ であった。試料として筑後川河口で採取した底泥を用いた。この試料の物性値は比重2.65, 平均径 $5 \mu m$, 粘性限界118%, 塑性限界50%, 強熱減量10.3%であった。またJIS A1204による粒度分布を図-2に示す。尚, 実験中に於ける試料の物性変化を防ぐ為, 実験は恒温室内で行い, 水温を $20 \pm 1.0^\circ C$ に保った。SS濃度は水面下7cmのところからサンプルを採取し, 孔径 $0.1 \mu m$ のメンブレンフィルターでろ過して乾燥後秤量した。サンプル

の粒度分布は, 光透過型遠心粒度分布測定装置で求めた。
3. 筑後川底泥の沈降特性 図-3に剪断応力が0.05%の下で初期濃度 C_0 を変化させて行った沈降実験の結果を示している。沈降のパターンは初期濃度にかかわらずほぼ相似である。 $C_0=4\%$ 以上で沈降が速くなっているが, これは凝集沈降が起った為であると思われる。よって本研究では $C_0=2\%$ 以下を対象とする。図-4は $C_0=2\%$ で種々の剪断応力の下での浮遊状態にあるSS濃度 C の経時変化を示している。 C は時間の経過と共に減少し, その減少率も時間と共に小さくなり, 最終的にはほぼ一定値 C_∞ に落ち着いている。また図-5は図-4から得た C_∞ と τ の関係を示したものである。実用上, 急激に C_∞ の値が減少するところの剪断応力の外挿値を全沈降限界剪断応力 τ_0 とすれば本研究で用いた粘性土の τ_0 は0.025%となる。さらに無次元濃度と無次元剪断応力($\tau/\tau_0=0.5$)は C_∞ が0.5になる(と)の関係と既に求められている数種の底泥及び今回の試料について示したものが図-6である。この図より底泥の種類に関係なく一本の曲線上にのることが解る。即ち $C_\infty=0.5$ になると τ_0 を知ると他の場合の C_∞ が推定できることになる。次に図-4の濃度変化を浮遊状態にある底泥の粒度分布の時間変化から見たのが図-7である。粒度分布と濃度の時間変化は良く対応しており, 時間の経過と共に最大径, 平均径とも減少し最終的には一定となっている。さらに, このことよ

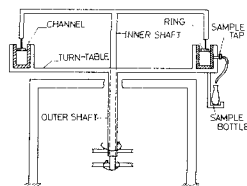


図-1

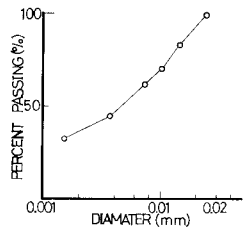


図-2

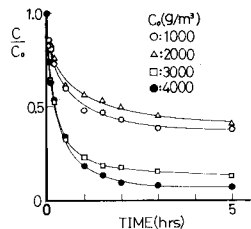
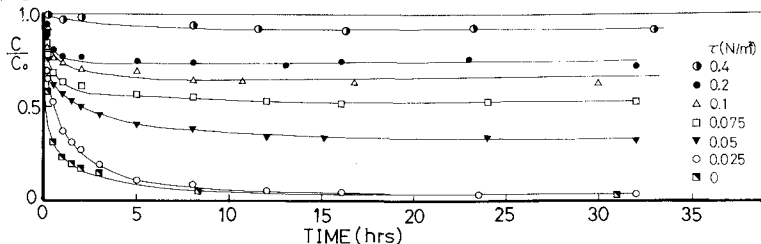


図-3

図-4



た様子はないことがわかる。

4. 一定剪断応力下での沈降過程に関する理論解

水路主流部では、混合拡散が充分に行なわれる為、鉛直濃度分布は検出されていない。粘土の様な微粒子は、一度沈降すると同一剪断応力下での再浮上はほとんどない、これらのことから主流部に於る平均濃度変化は

$$\frac{H}{C} \frac{\partial C}{\partial t} + V C(d, t) \Big|_{z=0} = 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{H} \int_0^H C(d, t) dz \quad (1)$$

とおける。粒子の沈降は通常 Stokes の式に従うが、 $u \sim 1\%$ のオーダの水中の境界層厚 $\delta \sim 0.1\text{cm}$ となり、底泥粒子の平均径のオーダ $0.001 \sim 0.001\text{cm}$ と比べると $10^2 \sim 10^3$ と大きい。従って、鉛直方向の粒子輸送には、境界層の存在が重要な意味を持つと考えられる。境界層中で球形粒子が相対速度 w で移動する時、その粒子には揚力が作用することが知られている²⁾。また、沈降実験の結果から、ある剪断応力下では、沈降しない粒子群の存在が知られている。粗度粒子は扁平であり、しかも、境界層中でどの様な相対速度を持って運動しているかは明らかにされていないけれど、一応、境界層中で揚力が作用するものと考え、粒子の沈降速度は

$$V = \beta d^2 - \alpha K^{1/2} d \quad (2)$$

ここで $\alpha = \frac{812 W}{3\pi \mu^{1/2}}$ $\beta = \frac{1}{18} \frac{P - \rho}{\mu}$ K : 速度勾配 P : 粒子密度
 ρ : 流体密度 μ : 分子粘性係数 g : 重力加速度

また、 $V C|_{z=0} = V \cdot \bar{C}$ と仮定し、 V として(2)を用いると、

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + H(\beta d^2 - \alpha K^{1/2} d) \bar{C} = 0 \quad (3)$$

(3)の解は、

$$\bar{C}(d, t) = \bar{C}(d, 0) \exp\left\{-\frac{\beta}{H}(d^2 - d_c d)t\right\} \quad d \geq \frac{\alpha}{\beta} K^{1/2} = d_c$$

$$\bar{C}(d, t) = \text{const} \quad d < d_c \quad (4)$$

粒子群全体の濃度 $\bar{C}$ も考えると

$$\bar{C}(t) = \int_0^\infty \bar{C}(d, t) d\alpha = \bar{C}_\infty + \int_{d_c}^\infty \bar{C}(d, 0) \exp\left\{-\frac{\beta}{H}(d^2 - d_c d)t\right\} d\alpha \quad (5)$$

ここで、今回用いた試料の粒度分布は、対数正規分布に従うことから、

$$\bar{C}(d, 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log d/d_{50}}{\log \sigma}\right)^2\right\} \cdot \frac{0.4343}{\log \sigma} \frac{1}{d} \quad (6)$$

となる。また $\bar{C}_\infty$ は、

$$\bar{C}_\infty = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\log d_c/d_{50}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (7)$$

となり、 $T = \frac{\beta}{H} d_{50}^2 t$, $\tau = 2.303 \log \sigma$, $\zeta = \frac{d_c}{d_{50}}$

$$z = \frac{\log d/d_{50}}{\log \sigma}, \quad x = \frac{\log d_c/d_{50}}{\log \sigma}$$

と置くことにより、(5)は最終的に

$$\bar{C} = \bar{C}_\infty + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left\{-\frac{z^2}{2} - T e^{2\tau z} + \zeta T e^{\tau z}\right\} dz \quad (8)$$

となる。

5. 結果及び考察 (8)の計算結果を図-8に示す。この図

より $\frac{C - C_\infty}{C_0 - C_\infty} = 0.5$ となる T を求めそれと C_0 との関係を示した

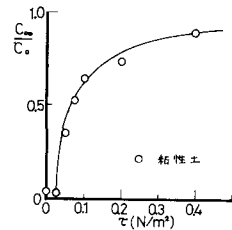


図-5

のが図-9である。図-10は図-4のデータより $\frac{C - C_0}{C_0 - C_\infty} = 0.5$ となる実時間 t を求めそれと C_0 との関係を示したものである。これらより $T = \frac{\beta}{H} d_{50}^2 t$ の β が求められる。これによって α を T に変換したのが図-8中のデータである。実験値と理論値とはほぼ合致している。さらに(17)と $d_c = \frac{\alpha}{\beta} K^{1/2}$ により α を求める。これらの結果より α, β は C_0 の関数と見なすことが出来るであろう。つまりこの α, β の値

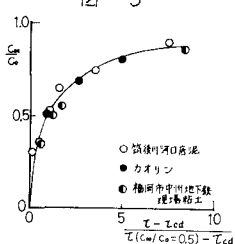


図-6

が得られれば、底泥の粒度分布と剪断応力を与えれば $\bar{C}$ の変化を知ることが出来るようになる。しかし、底泥の種類による α, β の変化は明らかでなく、今後は、種々の底泥の α, β の値の検討が必要であろう。

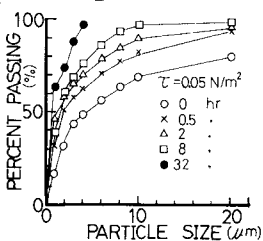


図-7

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費(般(丙))の補助を受けた。また実験には、則松孝晴氏の御協力を得た。共に記して謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 海田・柳田・栗谷
底泥の沈降と巻き上げに関する基礎的研究
17回衛生工学シンポジウム概要集(1980)
- 2) P.G. Shaffman
"The lift on a small sphere in a slow shear flow,"
J.H.F. Vol.2 Part 2 (1965)

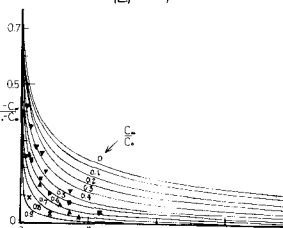


図-8

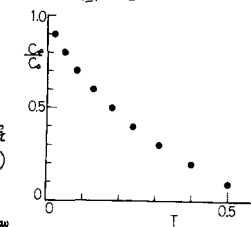


図-9

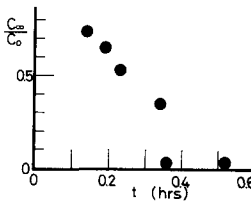


図-10